

Durchlichtprüfung diffraktiver zylindrischer Nullelemente

J. Lamprecht, N. Lindlein, J. Schwider

Lehrstuhl für Optik,
Universität Erlangen-Nürnberg

[mailto: lamprecht@optik.uni-erlangen.de](mailto:lamprecht@optik.uni-erlangen.de)

Diffraktive optische Elemente eignen sich hervorragend als Referenzelemente bei der Durchlichtprüfung zylindrischer Mikrolinsen hoher N.A. Der vorliegende Beitrag diskutiert die Genauigkeit der skalaren Näherung beim DOE-Design und stellt eine Methode zur Bestimmung der Phasenfrontfehler von Zylinder-DOEs vor.

1 Einführung

Viele Einsatzbereiche hochaperturiger mikrooptischer Zylinderlinsen (N.A. ~0,8) stellen hohe Anforderungen an die Qualität der Zylinderoptik. Messverfahren mit interferometrischer Genauigkeit sind daher unumgänglich. Wie bereits gezeigt werden konnte, stellt die Durchlichtprüfung in Form eines Mach-Zehnder-Interferometers ein sehr geeignetes Verfahren dar [1]. Wie Abb. 1 zeigt, arbeitet der realisierte Aufbau in einer Nulltest-Konfiguration, wobei diffraktive Zylinderoptiken als Referenzelemente eingesetzt werden.

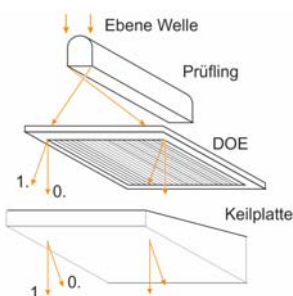


Abb. 1 Nulltest-Setup: Die 1. Ordnung des DOEs kompensiert die vom Prüfling ausgehende divergente Zylinderwelle zu einer (fast) ebenen Welle, welche die Informationen über die Aberrationen des Prüflings trägt.

Nachdem im Verlauf der bisherigen Arbeiten Wiederholgenauigkeit und Reproduzierbarkeit des Verfahrens vor allem im Hinblick auf mögliche Fehlerquellen beim Einsatz diffraktiver Nullelemente analysiert wurden (chromatische und Dejustage-Aberrationen), steht im Fokus der aktuellen Untersuchung die Frage nach der absoluten Genauigkeit des Verfahrens, vor allem im Bezug auf die optische Qualität der Nulloptiken.

2 Herstellung und Design der Nulloptik

Bei den verwendeten Nullelementen handelt es sich um computergenerierte binäre Ronchi-Phasengitter, die mittels e-Beam-Lithografie mit Numerischen Aperturen von bis zu 0.8 für eine Arbeitswellenlänge von 780nm hergestellt wurden. Die lateralen Abmessungen betragen 9mm×9mm.

Mit Hilfe einer Trägerfrequenz in Richtung der Zylinderachse kann die gewünschte erste Beugungsordnung räumlich separiert werden und das Licht unerwünschter Ordnungen unter Verwendung eines nachfolgenden kleinen Keilprismas (Abb. 1) bequem in der Fourierebene der Abbildungsoptik gefiltert werden.

3 DOE Fehler

Fehlerquellen und Fehlerbudget diffraktiver Optiken wurden in der Vergangenheit bereits ausführlich untersucht [2]. Zu den wichtigsten herstellungsbedingten Fehlerquellen werden u.a. gezählt: a) Substratfehler, b) Patternfehler (d.h. Schreib- oder Digitalisierungsfehler), c) Fehler des Tastverhältnisses, d) globale und lokale Ätztiefefehler und e) Designfehler durch (skalare) Näherungen der verwendeten Beugungstheorie. Zentrales Thema der vorliegenden Untersuchung war zunächst der letztgenannte Punkt, da bei den verwendeten numerischen Aperturen Gitterperioden in der Größenordnung der Wellenlänge auftreten und daher Abweichungen von einer idealen Zylinderwelle bei der Verwendung skalar genäherter DOE-Phasenfunktionen zu erwarten sind.

4 Rigorose Simulation der DOEs

Mittels der Differentiellen Methode wurde zunächst der zu erwartende Phasenfehler $\Delta\Phi(p)$ in Abhängigkeit von der Gitterperiode p simuliert [3].

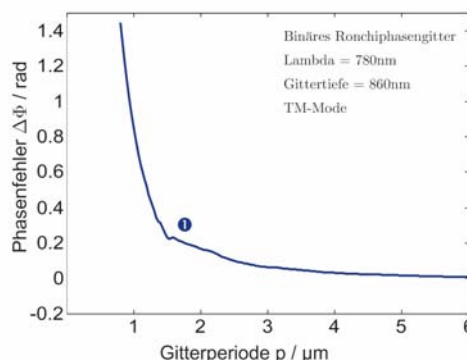


Abb. 2 Diagramm des Phasenfehlers in Abhängigkeit von der Gitterperiode für ein binäres Ronchi-Phasengitter.

Kurve 1 (Abb. 2) zeigt den berechneten Verlauf der Störung im Bereich kleiner Gitterstrukturen für den TM-Mode.

Zusammen mit der unter skalarer Näherung berechneten DOE-Phasenfunktion Φ_{DOE} kann nun auf den Phasenfehler $\Delta\Phi(x)$ in Abhängigkeit vom Abstand zur Zylinderachse und damit auf die resultierende Wellenfrontaberration geschlossen werden.

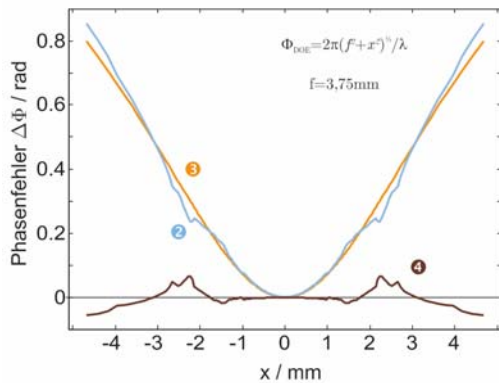


Abb. 3 Diagramm der Phasenfehler in Abhängigkeit vom Zylinderachsenabstand. Kurve 2: Fehler aufgrund skalarer Näherung. Kurve 3: Defokus-Aberrationen, Kurve 4: Restabweichung nach Subtraktion beider Kurven.

Der resultierende Fehler ist, wie Kurve 2 (Abb. 3) zunächst zeigt, mit einem pv-Wert von $\lambda/8$ beträchtlich. Kurve 3 zeigt jedoch den Defokusterm, einer der fünf bei jeder Messung zu eliminierenden Dejustageaberrationen. Kurve 4 zeigt schließlich die resultierende Abweichung nach Abzug des Defokusters. Er liegt im Bereich von $\lambda/50$ und ist somit für viele Anwendungen tolerierbar. Ist eine höhere Genauigkeit erforderlich kann natürlich der Phasenfehler im DOE-Design durch einen entsprechenden Korrekturterm kompensiert werden.

5 Prüfung der Nullelemente

Zur experimentellen Bestimmung der Qualität der Nullelemente wurde ein Dreistellungstest analog zu den Ausführungen in [2] durchgeführt: Drei Nullelemente (NE_1 , NE_2 und NE_3), jeweils bestehend aus DOE und Keilplatte mit identischen Designparametern werden gemäß der in Abb. 4 skizzierten Prüfsituation einander gegenübergestellt und im Durchlicht vermessen.

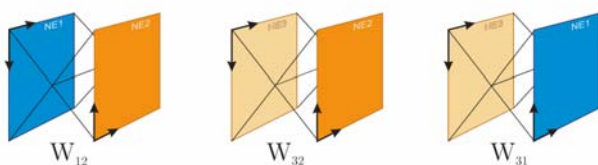


Abb. 4 Aberrationen W_{12} , W_{32} und W_{31} bei der Durchlichtprüfung dreier identischer Nullelemente.

Die drei resultierenden Wellenfronten (W_{12} , W_{32} und W_{31}) können daraufhin in folgender Weise ausgewertet werden:

$$W_{NE1} = \frac{1}{2}(W_{12} + W_{31} - W_{32} - W_{IF})$$

$$W_{NE2} = \frac{1}{2}(W_{12} + W_{32} - W_{31} - W_{IF})$$

$$W_{NE3} = \frac{1}{2}(W_{31} + W_{32} - W_{12} - W_{IF})$$

Hierbei wird mit W_{IF} die Wellenaberration des Leerrinterferometers bezeichnet. Ist diese nun hinreichend klein oder bekannt, kann in eindeutiger Weise auf die Phasenfehler der jeweiligen Nullelemente geschlossen werden.

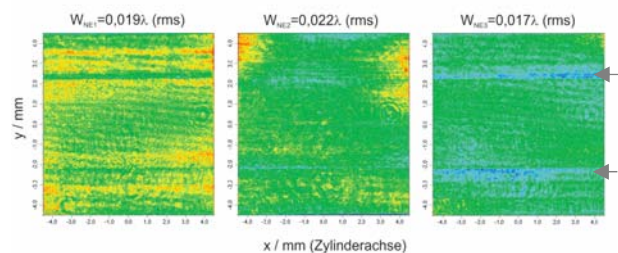


Abb. 5 Aberrationen der drei vermessenen diffraktiven Elemente. W_{IF} wurde als hinreichend klein angenommen.

Abb. 5 zeigt eine Beispielmessung. Die resultierenden Wellenfrontaberrationen liegen im Bereich $\lambda/50$ (rms). Die Orte maximaler Störung (Pfeile, Abb. 5) stimmen mit den vorausberechneten überein. Die darüber hinaus erkennbaren Phasenfehler stammen aus lokalen Ätztiefe- und Tastverhältnisvariationen. Eine weitere Separation der Fehlerquellen ist Gegenstand aktueller Forschung

Literatur

- [1] J. Lamprecht, N. Lindlein, J. Schwider, "Null test measurement of high-numerical aperture cylindrical micro lenses in transmitted light", *Proceedings of SPIE* Vol. 5180 (2003)
- [2] Y.-C. Chang, J. Burge, "Error analysis for CGH optical testing", *Proceedings of SPIE* Vol. 3782 (1999)
- [3] M. Collischon, *Analyse und Entwurf diffraktiver Elemente mit Subwellenlängenstrukturen*, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg (1999)
- [4] G. Schulz, J. Schwider, "Interferometric testing of smooth surfaces", in *Prog. in Optics XIII*, E. Wolf, (Hrsg.), Elsevier Publisher New York (1976)